

# Asnas Tradicionais de Madeira: Evolução, Comportamento e Reforço com Materiais Compósitos

## Traditional Timber Trusses: Evolution, Behaviour and Strengthening with Composites

Jorge Branco  
Assistente  
Universidade do Minho, DEC  
Guimarães

Ana Santos  
Bolseira de projecto FCT  
Universidade do Minho, DEC  
Guimarães

Paulo Cruz  
Prof. Associado com Agregação  
Universidade do Minho, DEC  
Guimarães

### RESUMO

O presente trabalho pretende realçar a importância da manutenção, conservação e reforço de coberturas de madeira, particularmente das suas ligações. Numa primeira fase expõe-se a evolução da geometria das asnas de madeira e das suas ligações. Segue-se uma síntese das anomalias mais comuns nestas estruturas e um resumo dos possíveis métodos de reforço, analisando-se em detalhe os reforços com materiais compósitos. Finalmente, são apresentados os resultados de uma análise experimental de ligações tradicionais de madeira reforçadas com materiais compósitos.

### ABSTRACT

This work intends to enhance the importance of the maintenance, conservation and strengthening of timber roofs, particularly of their joints. An evolution of the geometry of timber trusses and their joints followed by a summary of common pathologies and possible methods of strengthening in these structures is exposed. The strengthening technique using composite materials is also emphasized. Finally the results of an experimental analysis of strengthened timber joints with composite materials are presented.

## 1. INTRODUÇÃO

As coberturas tradicionais de madeira, quer sejam de uma, de duas ou mais águas, possuem na sua estrutura principal asnas. As asnas de madeira podem ser de inúmeras configurações geométricas. A escolha da sua tipologia recai sobre vários factores entre os quais se destacam o vão a cobrir, a natureza das acções a considerar, a inclinação da cobertura, a arquitectura e as operações de montagem e execução. Sobre as asnas repousam as madres, a fileira e a subestrutura de suporte à cobertura (varas e ripas), Figura 1.

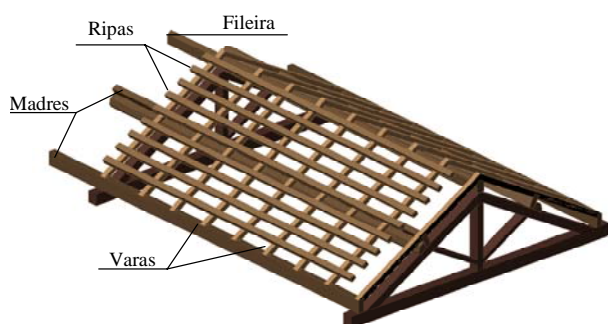


Fig. 1 - Organização de uma cobertura tradicional de madeira

As asnas são normalmente constituídas por um elemento horizontal (a linha), por duas pernas inclinadas para a formação da vertente do telhado, por um elemento vertical apertado no vértice do telhado pelas pernas (o pendural) e por duas escoras inclinadas que ligam as pernas ao pendural. Contudo, o grau de complexidade da

sua geometria aumenta com o vão a cobrir. O espaçamento normal entre as asnas, de eixo a eixo, é da ordem de 3 a 4 m.

Entre as espécies de madeira mais usadas nas coberturas em Portugal destacam-se o Pinho bravo (*Pinus pinaster*, Ait.) e o Eucalipto (*Eucalyptus globulus*, Labill), mais comuns em construções industriais (no início do século XX), o Castanho (*Castanea sativa*, Miller) e o Carvalho (*Quercus robur*, L.), em construções mais antigas como mosteiros e igrejas. Os principais tipos de asnas de madeira são: (a) simples; (b) vulgar ou de Palladio; (c) de tesoura; (d) de mansarda; (e) de lanternim; (f) de alpendre; (g) de nível, (h), (i), (j) fabris e (k) composta, ver Figura 2.

## 2. EVOLUÇÃO DAS ASNAS DE MADEIRA

### 2.1. Geometrias

As asnas simples, nascidas, provavelmente, no Renascimento, apresentam, como o nome indica, uma geometria elementar, constituída por linha e pernas, ver Figura 3 (a), e em alguns casos por um pendural, ver Figuras 3 (b), (c) e (d). Sofreu ao longo dos séculos várias transformações, passando progressivamente da solução mais simples e elementar, a triangulação, para sistemas cada vez mais complexos, quer no número de elementos constituintes quer nos sistemas de ligação entre eles, ver Figura 3 (d).

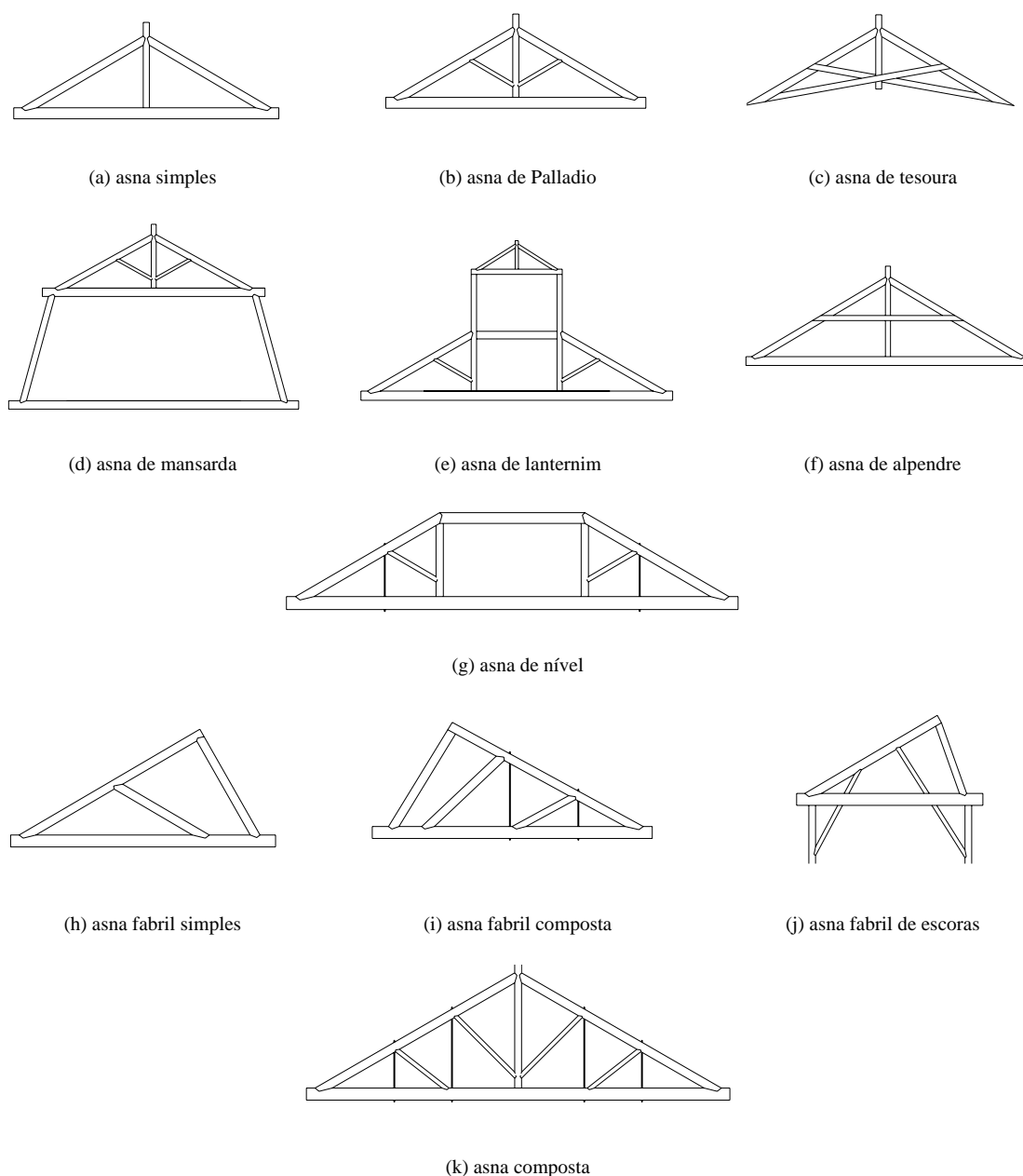


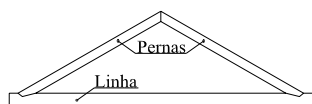
Fig. 2 - Tipologias mais frequentes de asnas de madeira em Portugal, Costa (1930)

O comportamento estrutural da asna simples da Figura 3 (a) é equivalente àquele de um arco de 3 rótulas: o esforço actua sobre as pernas, que trabalham à compressão, e a linha absorve a componente horizontal deste esforço. A componente vertical é compensada pela reacção vertical no apoio. O elemento vertical (pendural), se presente e se não estiver apoiado sobre a linha, Figura 3 (b), serve apenas para facilitar a união entre as pernas. Este esquema estático vem alterado no caso do pendural estar directamente apoiado sobre a linha, Figura 3 (c) ou ligado à linha por meio de elementos metálicos, Figura 3 (d). No caso (c), a linha passa a estar carregada a meio-vão estando sujeita para além da tracção, à flexão e ao esforço de corte nesta zona, agravando substancialmente a sua deformada. No último caso, Figura 3 (d) as ligações estão reforçadas por

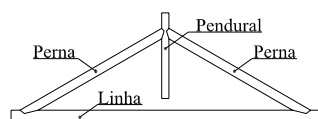
elementos metálicos, que lhes conferem rigidez e, consequentemente, uma melhor distribuição dos esforços por todos os elementos da asna.

No século XVI surgiram as asnas de Palladio, constituídas por linha, pernas e pendural e, adicionalmente, por duas escoras apoiadas na base do pendural, ficando a perna dividida em duas partes, Figura 4. As escoras, trabalhando à compressão, contribuem para melhorar o comportamento à flexão da estrutura, permitindo ao mesmo tempo, solicitações de valor superior. O ângulo formado entre a linha e a perna ronda os 30°, enquanto que entre a escora e o pendural é próximo de 60°. O vão está normalmente limitado a 8 m. Geralmente os elementos são unidos por samblagens. No entanto, com a descoberta do aço, estas uniões passaram

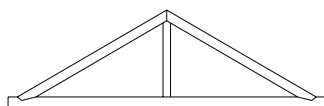
a estar complementadas com braçadeiras ou cavilhas na ligação linha-perna, Tês na ligação perna-escora e ainda pés de galinha na ligação perna-pendural e linha-pendural-escoras, Figura 4. A colocação destes elementos tem por objectivo, não só reforçar a ligação mas, principalmente, prever a eventual inversão de esforços devido a acções dinâmicas (vento e sismo). É de referir, ainda, que a colocação destes elementos permite ainda minimizar eventuais defeitos na execução das samblagens.



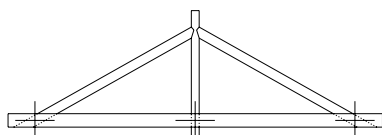
(a) Asna simples constituída por linha e pernas



(b) Asna simples constituída por linha, pernas e pendural



(c) Asna simples constituída por linha, pernas e pendural apoiado na linha



(d) Asna simples constituída por linha, pernas e pendural fixados por elementos metálicos à linha

Fig. 3 -Variantes da geometria da asna simples

A necessidade de construir coberturas com vão superiores a 8 m forçou a evolução das asnas até à tipologia mais complexa de asna composta. Para permitir maiores comprimentos para as pernas, são necessárias mais escoras. Ao existirem mais elementos comprimidos (escoras) é necessário a introdução de elementos (tirantes) para resistirem à componente de tracção que surge na ligação escora-linha, Figura 5 (a). A materialização de linhas com comprimento maior realiza-se, por vezes, através da união de dois elementos a meio vão da asna, Figura 5 (b). As dimensões destas asnas exigem que as madeiras estejam bem secas e desempenadas, completa resistência, para além de ser indispensável a perfeição das samblagens e ferragens, Costa (1930).

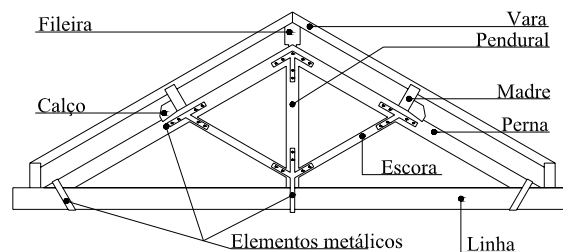
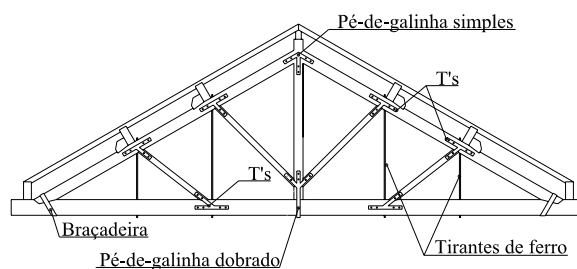
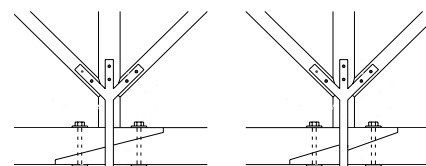


Fig. 4 - Asna de Palladio reforçada com elementos metálicos, Appleton (2003)



(a) Asna composta com tirantes de ferro reforçada com braçadeiras, Tês e pés de galinha, Appleton (2003)



(b) Pormenor da ligação de continuidade da linha, Munafò (2002)

Fig. 5 - Geometria de asna composta

## 2.2. Ligações

A construção de uma cobertura, por mais simples que seja, implica, desde logo, a necessidade de interligar os vários elementos que a constituem. A forma mais antiga de o fazer é através das chamadas ligações tradicionais ou samblagens, onde a transmissão de esforços é feita por atrito e compressão na interface entre os elementos a unir. Este contacto entre os elementos a unir é normalmente realizado por dentes, Figura 6, e em certos casos, estes são complementados com a execução de respiga e mecha, Figura 7. As ligações por respiga e mecha asseguram uma perfeita conexão entre as peças e previnem ao mesmo tempo deslizamentos laterais das mesmas, por intermédio de penetração. Têm como inconvenientes a mão-de-obra que exigem e a redução de secções que representam.

Com a descoberta do aço (século XIX) e simultaneamente com a necessidade de se construir em larga escala, as ligações por meio de samblagens passaram a ser substituídas por ligações usando elementos metálicos tais como: pregos, parafusos, cavilhas, bandas metálicas, pés de galinha e Tês. Estes elementos auxiliares têm a finalidade de estabilizar a ligação, de impedir o deslizamento lateral da peça e de

prever possíveis inversões de esforços. Os elementos metálicos mais comuns em asnas de madeira são: pé de galinha para a ligação das pernas ao pendural; Tê para a

ligação das pernas às escoras; pé de galinha dobrado para a ligação do pendural à linha; e a braçadeira que aperta as pernas à linha, muito comum no século XIX, Figura 8.

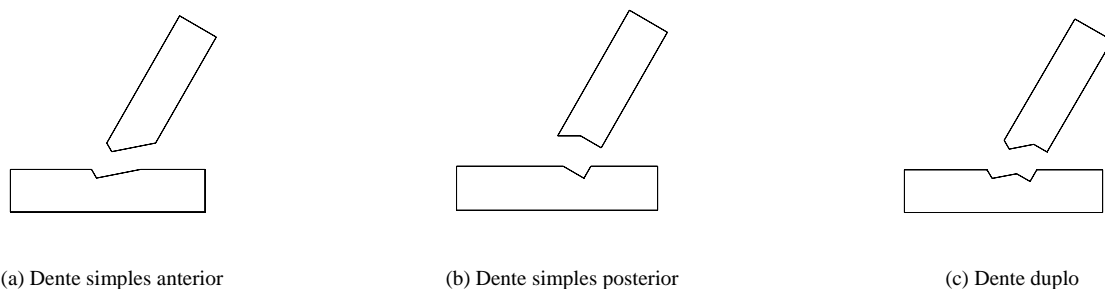


Fig. 6 – Ligações tradicionais de dente simples e dente duplo

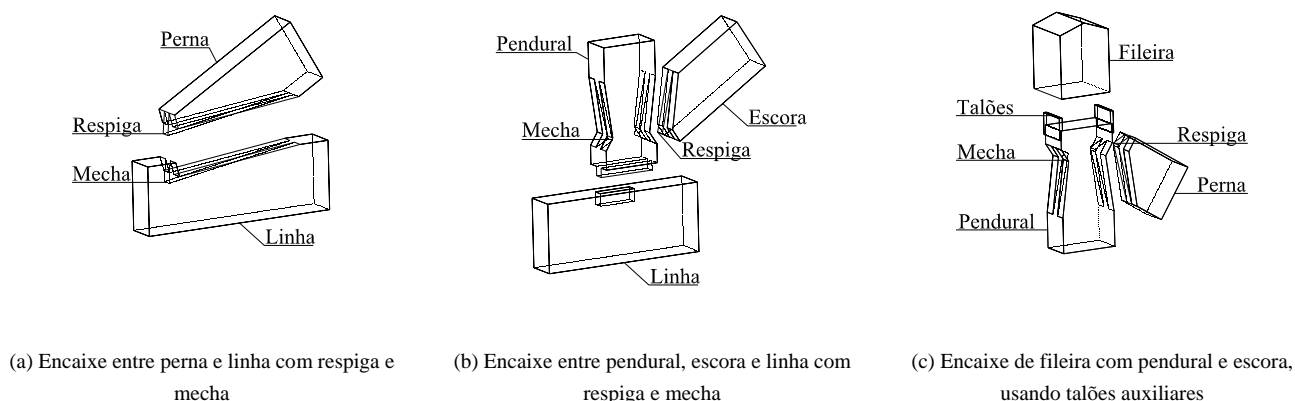


Fig. 7 - Ligações tradicionais de uma asna de madeira usando respiga e mecha, Appleton (2003)

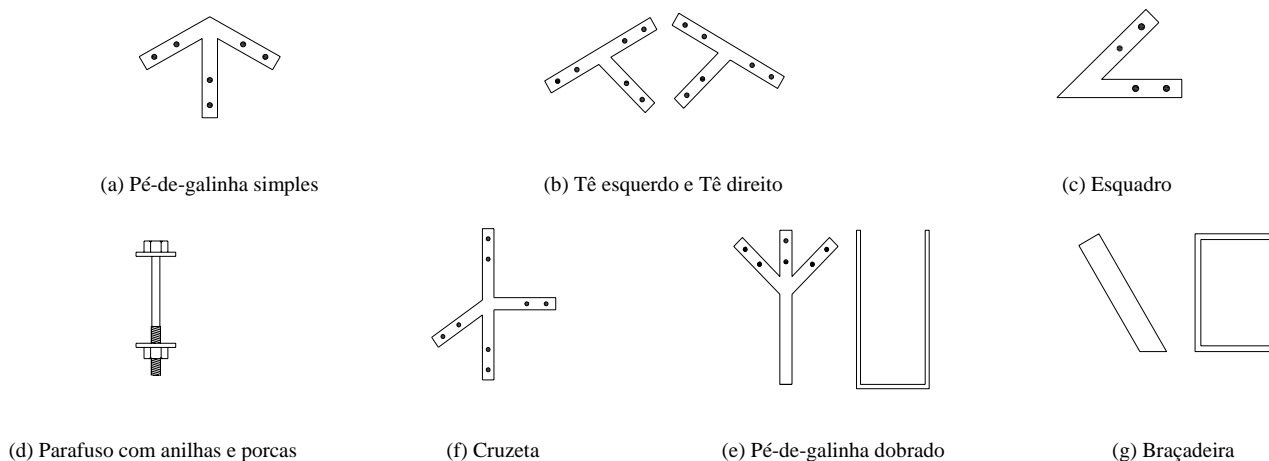


Fig. 8 - Elementos metálicos auxiliares para a execução das ligações, Appleton (2003)

### 3. ANOMALIAS MAIS COMUNS

Actualmente, muitas estruturas necessitam de reabilitação por apresentarem anomalias próprias do envelhecimento ou por evidenciarem sinais de degradação devido à falta de manutenção, erros de projecto, construção deficiente ou causas acidentais. O seu diagnóstico pode conduzir a um conjunto de medidas

de carácter estrutural que deverão ser adoptadas para garantir a segurança e estabilidade da mesma.

As anomalias mais comuns em coberturas de madeira podem ser agrupadas em três classes. A primeira, de origem biótica, traduz-se pela perda de secção resistente das peças provocada pelos agentes xilófagos, Figura 9 (a). São mais comuns nas zonas dos apoios, devido à presença de águas infiltradas e às deficientes

condições de arejamento (erros construtivos), Figura 9 (b). A segunda classe de anomalias prende-se com as exigências estruturais, nomeadamente a falta de resistência das peças às acções actuantes, resultando em deformações excessivas, Figura 9 (c) e contraventamento ineficiente, Figura 9 (d). Apontam-se como principais causas destas anomalias a alteração da função da construção ao longo da sua vida, traduzindo-se em cargas de serviço superiores que o previsto, a insuficiência das secções dos elementos estruturais face às solicitações em causa, a insuficiência de elementos de contraventamento, o deficiente dimensionamento ou execução das ligações, a presença de defeitos locais nas peças de madeira, entre outros.



(a) Degradação biológica, Piazza (2004)



(b) Podridão na entrega da linha, Piazza (2001)



(c) Deformações excessivas nas pernas



(d) Instabilização devido a contraventamento insuficiente

Fig. 9 – Anomalias frequentes em coberturas de madeira

Por último, as concepções estruturais inadequadas podem introduzir esforços, num determinado elemento ou em vários, que podem comprometer a estabilidade local e global da estrutura. Os exemplos mais comuns deste género de anomalia são a ligação inapropriada do pendural à linha, Figura 10 (a), a aplicação das madres com excentricidade relativamente aos nós da asna Figura 10 (b), induzindo assim momentos flectores que podem ser significativos e, a aplicação de esforços de corte na linha, Figura 10 (c).

A linha deve estar suspensa no pendural de forma a reduzir as suas deformações devidas ao peso próprio. A ligação deve ser articulada e impedir as deformações no plano ortogonal ao plano da estrutura (asna). A colocação das madres com excentricidade relativamente aos nós

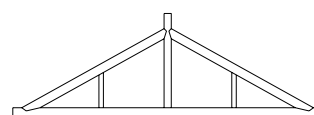
altera a distribuição de esforços na asna, em particular, nas pernas. A consideração de uma excentricidade de apenas 20 cm, um valor muito comum em várias obras visitadas, é suficiente para condicionar a segurança destes elementos (pernas), Branco (2006).



(a) Pendural pregado à linha



(b) Aplicação das madres excêntricas relativamente ao nó escora/perna



(c) Asna simples com dois elementos verticais

Fig. 10 - Concepções estruturais erradas comuns

#### 4. MÉTODOS DE REFORÇO ESTRUTURAL DE COBERTURAS DE MADEIRA

A recuperação de coberturas de madeira é frequente na reabilitação do nosso património arquitectónico. O tipo de intervenção é extremamente importante uma vez que a natureza e concepção original da construção deverão ser respeitados. Esta acção passa pela substituição total ou parcial dos elementos degradados, com eventual reforço estrutural. Os métodos de reforço estrutural podem ser divididos em três grupos:

- O método tradicional, que consiste na substituição das zonas degradadas por peças inteiramente novas, de dimensões e propriedades semelhantes às originais, ver Figura 11;

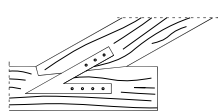
- O método mecânico, que se traduz pela adição de elementos metálicos (cavilhas, parafusos de porca, chapas denteadas, braçadeiras e esquadros) ou de materiais compósitos, ver Figura 12 e 13;

- O método adesivo, que consiste na substituição da parte deteriorada por argamassa de resina epoxídica ligada à madeira através de varões metálicos ou compósitos, ver Figura 14.

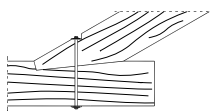
A opção por uma técnica de reforço só deverá ser efectuada após um correcto diagnóstico das anomalias existentes. A escolha da solução final deverá ser tomada a partir de um estudo exaustivo e criterioso de todas as soluções propostas.



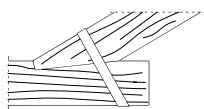
Fig. 11- Reforço estrutural pelo método tradicional, Piazza (2001)



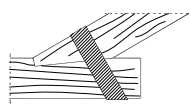
(a) Reforço com esquadro metálico



(b) Reforço com varão metálico



(c) Reforço com braçadeira metálica



(d) Reforço com materiais compósitos (manta)

Fig. 12 - Recuperação estrutural de ligações de asnas pelo método mecânico

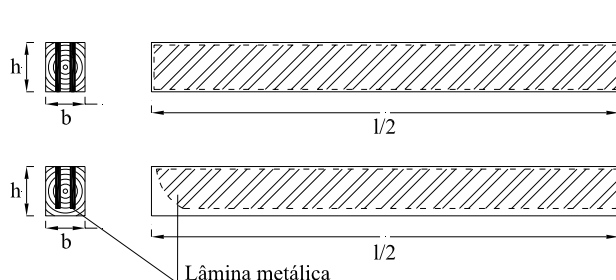


Fig. 13 - Recuperação estrutural de vigas pelo método mecânico, Tampone (2000)



Fig. 14 - Reconstituição da ligação, pelo método adesivo, através de varões compósitos e injeções com resina epoxídica, Appleton (2003)

Alguns aspectos fulcrais terão de ser tidos em conta para a concepção de um reforço eficaz:

- No caso de se tratar de troços de madeira nova, esta deverá ser da mesma espécie que a existente;

- Quando se trata do reforço local de uma zona degradada, há que ter o cuidado em preservar a sua rigidez inicial, a fim de não provocar alterações significativas na distribuição de tensões entre elementos e ligações e, consequentemente, não comprometer o comportamento global da estrutura, quer sob acções estáticas quer cíclicas;

- Evitar concepções que possibilitem concentrações de humidade na zona reforçada e que comprometam o comportamento da estrutura sob condições acidentais (fogo).

Infelizmente, assiste-se a inúmeros casos práticos cuja concepção de reforço é errónea. É evidente, o insuficiente conhecimento sobre a utilização da madeira enquanto material estrutural: as suas propriedades físicas e mecânicas caíram no esquecimento e existe uma grande dificuldade em analisar e entender as suas anomalias. A dificuldade em prever o real comportamento das ligações tradicionais geralmente conduz a intervenções exageradamente do lado da segurança. Além do mais, a incompreensão do comportamento global da cobertura poderá resultar em tensões inaceitáveis nos restantes elementos em consequência de um inadequado reforço da ligação (em termos de rigidez). Na Figura 15 está ilustrada uma excessiva rigidificação de uma ligação inicialmente semi-rígida, revelando a falta de preocupação em preservar a rigidez inicial da ligação. De facto, se o mecanismo da ligação impede o livre movimento da madeira, a rotura de uma estrutura poderá ocorrer pelos seus membros, o que deve ser de todo o custo evitado perante a possibilidade de rotura frágil, especialmente nos elementos traccionados. Outros aspectos a apontar passam pela possibilidade de ocorrência de um deslocamento relativo entre os dois elementos concorrentes, além de que a placa de aço impede futuras inspecções na zona reforçada e provoca concentrações de humidade nesta zona possibilitando o ataque biológico. Finalmente é de salientar o perigo que esta concepção de reforço representa em caso de incêndio.



Fig. 15 - Rigidificação de uma ligação originalmente semi-rígida, Piazza (2004)

## 5. REFORÇO COM MATERIAIS COMPÓSITOS

Os sistemas compósitos foram desenvolvidos no decurso do século XX com o objectivo de criar materiais capazes de ultrapassar certas limitações dos materiais tradicionais. Hoje em dia, assiste-se a uma grande aposta



na aplicação deste tipo de materiais como solução de reforço de elementos estruturais de betão, de aço ou de madeira. Trata-se de uma técnica fácil e de simples execução mas ao mesmo tempo capaz de melhorar as propriedades mecânicas. São os chamados “compósitos estruturais”, ou polímeros reforçados com fibras (FRP), que resultam da combinação de fibras e de uma matriz. As fibras são responsáveis pela resistência do compósito e a matriz é o elemento que as une, sendo responsável pela transmissão dos esforços. As matrizes podem ser constituídas por resinas termoplásticas (polietileno, polipropileno, poliéster, policarbonatos) ou termoendurecíveis (de epóxico, fenólicas, de poliéster, de poliuretano ou de poliamida). Das inúmeras fibras existentes no mercado, as que vêm demonstrando melhor eficiência no reforço e recuperação de estruturas de madeira são as fibras de vidro e de carbono.

As formas comerciais de sistemas de FRP mais frequentemente usadas no reforço de elementos de madeira podem dividir-se em três grupos principais: os sistemas moldados, ou curados *in situ*, caracterizados pela junção da matriz e das fibras no local a reforçar (mantas unidireccionais ou pluridireccionais); os sistemas pré-fabricados, caracterizados por perfis pré-fabricados que já integram a matriz (laminados); e os varões.

Os polímeros reforçados com fibras de carbono são os que apresentam características mecânicas mais elevadas: resistência à tracção entre 4000-5000 MPa em formato manta, 2000-3000 MPa em formato laminado; módulo de elasticidade entre 200 e 400 GPa em formato manta e 100-200 GPa quando laminado ou em varão. Os compósitos com fibras de vidro são mais utilizados por terem um custo bastante inferior e por possuírem valores de propriedades mecânicas mais semelhantes aos da madeira: módulo de elasticidade aproximadamente de 70 GPa, no formato manta, e 40 GPa, em formato varão, e resistência à tracção de aproximadamente 2500 MPa.

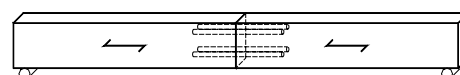
Actualmente, os benefícios associados à aplicação destes materiais resumem-se a:

- Possibilidade de aplicação em ambientes agressivos dada a sua resistência física e química (no caso das fibras de carbono não é necessário sequer a sua protecção);
- Facilidade de manuseamento associado ao baixo peso próprio;
- Vasta gama de materiais compósitos com características mecânicas diferentes: de facto é possível escolher produtos com módulo de elasticidade superior ao do aço, com deformações maiores, ou ainda resistência à tracção superior.

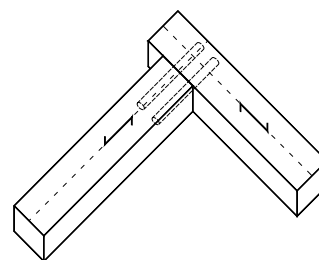
O uso de materiais compósitos em estruturas de madeira, quer maciças quer lameladas coladas, tem dois fins principais: a união entre elementos através de varões e o reforço de ligações. No primeiro caso, a realização da união entre elementos através de varões compósitos é muito semelhante à utilização de varões metálicos, Figura 16.

O reforço de ligações exige especial atenção, uma vez que o objectivo não passa pelo aumento da rigidez da

ligação mas pelo aumento da sua capacidade de carga e da sua capacidade dissipativa. Visando o aumento da capacidade de carga da ligação, o reforço passa pelo controlo das tracções da madeira perpendicularmente às fibras, especialmente relevante no caso de ligações com reduzido número de conectores de grande diâmetro (apresentam rotura frágil), ver Figura 17 (a). Visando o aumento da capacidade dissipativa, caso das ligações viga-pilar, é aconselhável a interposição de várias camadas de laminado FRP, ver Figura 17 (b). Por último, salienta-se, ainda, que as fibras de vidro são as mais usadas quando é pretendido o aumento da ductilidade das ligações e as fibras de carbono quando os objectivos são o incremento da rigidez e da resistência. Cabe ao projectista analisar as necessidades de reforço e escolher o material mais adequado atendendo à relação custo-benefício, ou seja, optar entre o reforço tradicional com elementos metálicos e o reforço inovador com materiais compósitos de fibra de vidro ou de carbono.

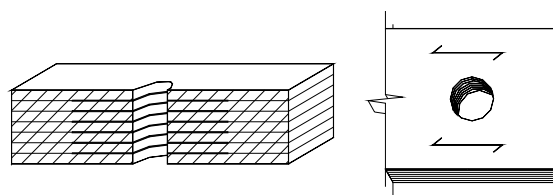


(a) União entre dois topos

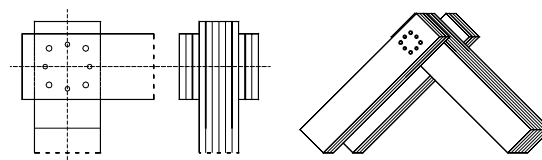


(b) União entre elementos em forma de L

Fig. 16 - União entre elementos de madeira através de varões FRP, CNR (2005)



(a) Reforço da ligação de modo a aumentar a capacidade resistente



(b) Reforço da ligação viga-pilar com vista a aumentar a sua ductilidade

Fig. 17 – Exemplos da utilização de laminados de FRP no reforço de ligações de madeira, CNR (2005)

## 6. PROGRAMA EXPERIMENTAL

No Laboratório de Ensaio de Estruturas (LEST), do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, foram realizados ensaios em ligações tradicionais de madeira de dente simples, em provetes à escala real. Escolheu-se a ligação entre a linha e a perna com um ângulo de abertura de 30°. Esta campanha experimental está dividida em duas partes: numa primeira fase realizaram-se ensaios monotónicos e cíclicos de ligações não reforçadas, posteriormente realizaram-se ensaios cíclicos em ligações reforçadas com mantas de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono). Os ensaios realizados em ligações tradicionais estão resumidos no Quadro I.

Quadro I – Ensaios realizados em ligações tradicionais

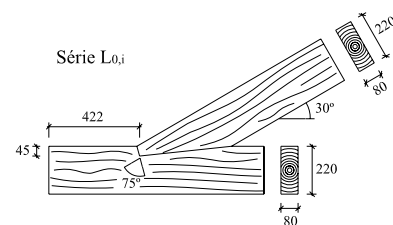
Ligação	Provetes	Carregamento
Não reforçadas (Originais)	M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub>	Monotónico (+)
	M <sub>4</sub> , M <sub>5</sub> , M <sub>6</sub>	Monotónico (-)
	L <sub>0,1</sub> , L <sub>0,2</sub> , L <sub>0,3</sub>	Cíclico
Reforçadas com CFRP	Uma manta de 10 cm L <sub>1,1</sub> , L <sub>1,2</sub> , L <sub>1,3</sub>	Cíclico
	Duas mantas de 5 cm L <sub>2,1</sub> , L <sub>2,2</sub> , L <sub>2,3</sub>	Cíclico

### 6.1. Geometria e materiais utilizados

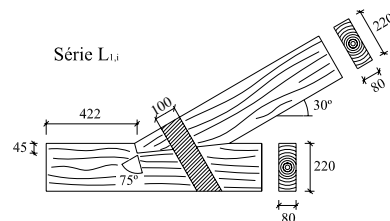
A Figura 18 apresenta a geometria dos provetes ensaiados: (a) ligação não reforçada (provetes L<sub>0,i</sub>), (b) ligação reforçada com uma manta CFRP de 10 cm (provetes L<sub>1,i</sub>) e por último (c), ligação reforçada com duas mantas CFRP de 5 cm (provetes L<sub>2,i</sub>). As principais características dos constituintes do sistema de CFRP utilizado estão resumidas no Quadro II. A madeira utilizada é da espécie Pinho bravo (*Pinus pinaster*, Ait.), classificado ainda na carpintaria como pertencente à Classe EE, de acordo com a Norma NP 4305:1995. Já no laboratório, foram realizados ensaios de caracterização da madeira, em particular ensaios para a quantificação do módulo de elasticidade, em flexão e em compressão, na direcção paralela às fibras, segundo a EN 408:2003.

Quadro II - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados, MAPEI (2005)

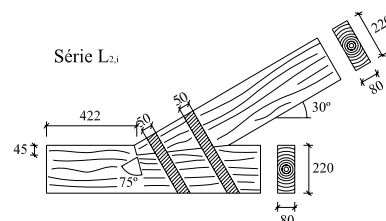
Material	Espessura (mm)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
MapeWrap C UNI – AX 300/20	0,167	4800	230
Mapewood Gel 120	-	30	2



(a) Ligação não reforçada (Série L<sub>0,i</sub>)



(b) Ligação reforçada com uma manta de CFRP de 10 cm (Série L<sub>1,i</sub>)



(c) Ligação reforçada com duas mantas de CFRP de 5 cm (Série L<sub>2,i</sub>)

Fig. 18 – Geometria das ligações ensaiadas (dimensões em mm)

### 6.2. Sistema de ensaio

As ligações, montadas sobre um cavalete metálico imóvel, eram solicitadas por dois actuadores independentes, um horizontal e um vertical. O vertical, alinhado com o eixo da perna, permite a aplicação da compressão constante ao longo do ensaio, simulando o efeito decorrente dos esforços axiais actuantes na perna resultantes das cargas permanentes da cobertura. O actuador horizontal, posicionado a uma altura de 70 cm relativamente ao centro teórico da ligação, permite a aplicação de uma força transversal com um ciclo de carga programado. Os dois actuadores têm uma capacidade máxima de 50 kN e 200 kN e uma extensão máxima de 160 mm e 50 mm, respectivamente. O esquema de ensaio pode ser observado na Figura 19. Numa primeira fase do programa experimental foram ensaiadas ligações tradicionais não reforçadas sob carregamento monotónico (seis provetes), que serviram essencialmente para determinar o comportamento elástico da ligação, nomeadamente o limite elástico de deslocamentos no sentido de abertura ( $d_e^+$ ) e fecho ( $d_e^-$ ) do ângulo.



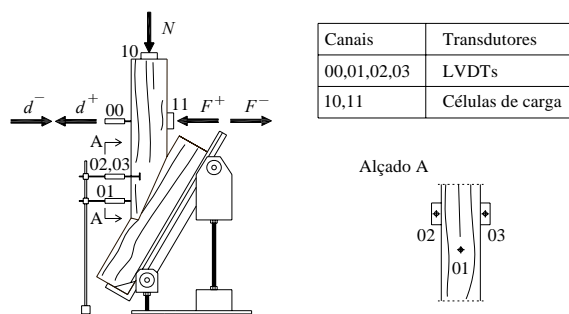


Fig. 19 – Esquema de ensaio

Nestes ensaios aplicou-se, inicialmente, uma força de compressão na perna através do actuador vertical de 25 kN, que se manteve constante durante todo o ensaio. De seguida, aplicou-se uma força transversal  $F^+$ , na perna, através do actuador horizontal, que impunha um deslocamento máximo de +50 mm a uma velocidade de 0,028 mm/s (abertura do ângulo da ligação). Seguiram-se os ensaios com aplicação de força transversal  $F^-$  mediante a aplicação de um deslocamento máximo de -50 mm (diminuição do ângulo da ligação). Finalmente, procedeu-se à execução dos ensaios cíclicos ( $L_{0,i}$ ) com ciclos de carga e descarga, de acordo com a norma EN 12512:2001. O procedimento de ensaio incluiu um ciclo de deslocamentos na gama  $[0,25 d_e^+; 0,25 d_e^-]$ ; um ciclo de deslocamentos na gama  $[0,50 d_e^+; 0,50 d_e^-]$ ; três ciclos de deslocamentos na gama  $[0,75 d_e^+; 0,75 d_e^-]$ ; três ciclos de deslocamentos na gama  $[(1+n) d_e^+; (1+n) d_e^-]$  com  $n = 0, 1, 2, \dots$ , até à rotura da ligação, Figura 20.

Após os ensaios monotónicos e cíclicos das ligações não reforçadas, realizaram-se ensaios cíclicos das ligações reforçadas com uma manta de 10 cm de CFRP ( $L_{1,i}$ ) e das ligações reforçadas com duas mantas de 5 cm de CFRP espaçadas 15 cm entre si ( $L_{2,i}$ ). Por falta de provetes suficientes no laboratório para a realização dos ensaios monotónicos das ligações reforçadas com compósitos, não foi possível a determinação dos respectivos valores limite elásticos de deslocamento ( $d_e^+$  e  $d_e^-$ ). Assim, para a definição do procedimento de ensaios referente aos ensaios cíclicos das ligações reforçadas, adoptaram-se os valores limite obtidos numa campanha experimental semelhante, realizada anteriormente, em ligações reforçadas com varões metálicos.

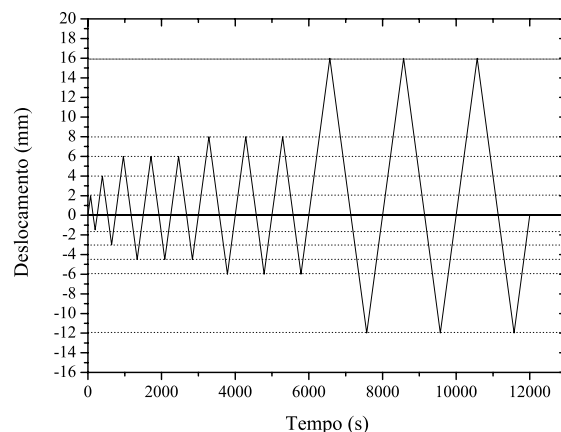


Fig. 20 - Deslocamentos impostos nos ensaios cíclicos

### 6.3. Apresentação e análise dos resultados

Os diagramas força-deslocamento que caracterizam o comportamento histerético dos três tipos de ligações, com um valor de energia intermédio ( $L_{0,2}$ ,  $L_{1,3}$ ,  $L_{2,1}$ ) estão indicados na Figura 21. O Quadro III apresenta para cada tipo de reforço os principais resultados em termos de coeficiente de amortecimento equivalente ( $v_{eq}$ ), energia total dissipada ( $E_d$ ), amplitude dos valores máximos de deslocamentos, número de ciclos completos e valores máximos de força.

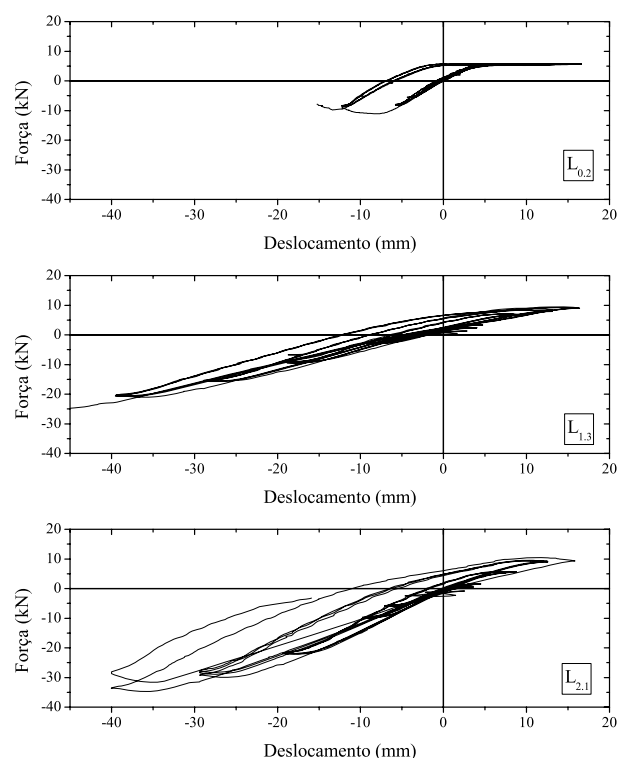


Fig. 21 - Curvas força - deslocamento representativas dos ensaios cíclicos para as três séries de ligações analisadas

Quadro III - Resultados obtidos nas ligações para ensaios cíclicos

Série	$v_{eq}$ (%)	Energia Dissipada (kJ)	Amplitude [ $d_{máx}^+$ , $d_{máx}^-$ ] (mm)	Nº ciclos completos	$F_{máx}^+$ (kN)	$F_{máx}^-$ (kN)
L <sub>0,1</sub>	4,1	206,05	31,83 [16,60; -15,23]	10	5,66	-10,36
L <sub>0,2</sub>	5,1	230,79	31,83 [16,60; -15,23]	10	5,87	-11,33
L <sub>0,3</sub>	5,1	252,32	33,28 [16,26; -17,02]	10	7,08	-13,02
Média	4,8	229,72	32,31	10	6,20	-11,57
L <sub>1,1</sub>	13,1	2529,08	55,73 [15,57; -40,16]	15	15,52	-39,40
L <sub>1,2</sub>	15,1	1420,50	52,75 [12,74; -40,01]	14	10,75	-29,25
L <sub>1,3</sub>	12,2	1766,90	65,37 [16,39; -48,98]	17	11,04	-26,57
Média	13,5	1905,49	57,95	15	12,44	-31,74
Relação L <sub>1</sub> /L <sub>0</sub>	2,8	8,29	1,79	1,5	2,00	2,74
L <sub>2,1</sub>	12,6	1958,73	55,88 [15,84; -40,04]	15	12,84	-37,61
L <sub>2,2</sub>	12,8	2070,99	56,76 [16,36; -40,40]	15	8,06	-32,54
L <sub>2,3</sub>	26,6	1545,19	42,01 [12,89; -29,12]	14	13,43	-21,49
Média	12,7	2014,86	56,32	15	10,45	-35,08
Relação L <sub>2</sub> /L <sub>0</sub>	2,6	8,77	1,74	1,5	1,69	3,03

Nota: A série L<sub>2,3</sub> não foi considerada no cálculo das médias por apresentar valores anormais

Uma estimativa da energia dissipada durante os ciclos histeréticos é apresentada através do coeficiente de amortecimento equivalente ( $v_{eq}$ ), determinado no terceiro ciclo correspondente à última amplitude dos deslocamentos completa aplicada, de acordo com a Norma EN 12512:2001 e Fórmula (1).

$$v_{eq} = \frac{E_d}{E_p \times 2 \times \pi} \quad (1)$$

onde:

-  $E_d$  é a energia dissipada que corresponde à área do gráfico formado pelo ciclo;

-  $E_p$  é a energia potencial que corresponde à soma das áreas dos triângulos formado pelos valores máximos de deslocamento e força no ramo positivo e negativo.

Da análise dos dados do Quadro III e da Figura 21 torna-se evidente a assimetria do comportamento das ligações para acções cíclicas e a menor capacidade em dissipar energia por parte das ligações não reforçadas (L<sub>0,i</sub>) comparativamente com as reforçadas (L<sub>1,i</sub> e L<sub>2,i</sub>).

Relativamente às ligações não reforçadas, a dissipação de energia ocorre apenas no ramo negativo (diminuição do ângulo de abertura). No ramo positivo (abertura do ângulo) o comportamento exibido é não linear com ciclos estreitos, não havendo qualquer dissipação de energia. No que se refere às ligações reforçadas, pode-se afirmar que, quer para a solução com uma manta (L<sub>1,i</sub>), quer para a solução com duas mantas

(L<sub>2,i</sub>), o comportamento no ramo positivo (abertura do ângulo) define-se como não linear, com ciclos delgados. No ramo negativo (fecho do ângulo), o comportamento define-se como linear elástico, em função do atrito que se gera na superfície de contacto entre a linha e a perna, com ciclos amplos. É evidente a semelhança dos valores atingidos por estas duas soluções em termos de energia dissipada, força máxima e deslocamentos máximos.

Comparando os resultados obtidos entre a solução não reforçada e as duas soluções reforçadas, as melhorias no comportamento são significativas, em particular, no ramo negativo: a força e deslocamento máximo negativos quase que triplicam, o que contribui para um melhor comportamento em termos de capacidade resistente. Apesar dos valores máximos da força e do deslocamento atingidos pela solução com uma manta (L<sub>1,i</sub>) serem superiores aos valores da solução com duas mantas (L<sub>2,i</sub>), é com esta última solução de reforço que se obtém maior ductilidade pelos ciclos mais largos. Mas os benefícios mais importantes da aplicação do reforço em ligações tradicionais, neste caso recorrendo a materiais compósitos, são a melhoria da ductilidade e o aumento da capacidade em dissipar energia. Os ciclos são mais largos, e como o comportamento da ligação reforçada é mais estável, o maior número de ciclos é atingido nos ensaios, o que se traduz num incremento substancial no coeficiente de amortecimento equivalente (é superior a 2,5 vezes o valor apresentado pelas ligações não reforçadas).

Nas ligações sem reforço (L<sub>0,i</sub>) não foram detectados danos significativos no nó, Figura 22. A rotura ocorreu sempre no ramo negativo durante o incremento de

deslocamento de -12 mm a -18 mm, que corresponde ao primeiro ciclo da série  $[3 d_e^+; -3 d_e^-]$ , devido à perda de contacto entre os dois elementos.



Fig. 22 - Fim do ensaio cíclico em ligações não reforçadas (L0,i)

Na solução com uma manta de 10 cm ( $L_{1,i}$ ) atinge-se a rotura da manta e a descolagem na superfície de contacto dos dois elementos, finalizando com a sua divisão em tiras, como se pode observar na Figura 23.



(a) Etapa 1: rotura da manta na superfície de contacto dos dois elementos



(b) Etapa 2: descolagem da manta na superfície de contacto



(c) Etapa 3: divisão da manta em tiras

Fig. 23 - Evolução da rotura nas ligações reforçadas com uma manta de 10 cm de CFRP ( $L_{1,i}$ )

A rotura, neste provetes, ocorreu sempre no ramo negativo, para gamas diferentes de deslocamentos (rotura não uniforme):

- No primeiro provete, a rotura deu-se com um deslocamento de -36mm, que corresponde ao segundo ciclo da série  $[4 d_e^+; -4 d_e^-]$ ;

- No segundo provete, a rotura ocorreu durante o incremento de deslocamento de -27 mm a -36 mm, que corresponde ao primeiro ciclo da série  $[4 d_e^+; -4 d_e^-]$ ;

- No terceiro e último provete, a rotura ocorreu durante o incremento de deslocamento de -36 mm a -45 mm, que corresponde ao primeiro ciclo da série  $[5 d_e^+; -5 d_e^-]$ .

Na solução com duas mantas de 5 cm ( $L_{2,i}$ ), a rotura inicia-se com a cedência da manta posterior ao dente, na superfície de contacto entre os dois elementos, Figura 24 (a). Segue-se o esmagamento e rotura da perna junto à superfície de contacto entre os dois elementos, Figura 24 (b). Por fim verifica-se a rotura total das duas mantas, Figura 24 (c). A rotura ocorreu sempre no ramo negativo, com um deslocamento de -36 mm, correspondendo ao segundo ciclo da série  $[4 d_e^+; -4 d_e^-]$ .



(a) Etapa 1: cedência da manta posterior ao dente, na superfície de contacto dos dois elementos



(b) Etapa 2: esmagamento da perna na superfície de contacto



(c) Etapa 3: rotura total das duas mantas

Fig. 24 - Evolução da rotura nas ligações reforçadas com duas mantas de 5 cm de CFRP ( $L_{2,i}$ )

## 7. CONCLUSÕES

Ao longo de séculos a madeira - como material leve, abundante, adaptável e de fácil manuseamento - tem sido utilizada em aplicações estruturais. As estruturas de madeira mais correntes em Portugal são as coberturas, as com o sistema estrutural principal constituído por asnas. A complexidade das asnas evoluiu ao longo dos tempos com a necessidade de cobrir vãos maiores, passando de asnas simples a geometrias mais complexas. A forma de ligar os vários elementos constituintes das asnas acompanhou igualmente esta necessidade de se construir numa escala maior. As ligações tradicionais por

samblagens começaram a ser complementadas por elementos metálicos.

Actualmente, grande parte destas estruturas necessita de reabilitação por apresentarem anomalias próprias do envelhecimento ou por evidenciarem sinais de degradação prematura devido à falta de manutenção, erros de projecto, construção deficiente ou causas acidentais. As ligações entre os vários elementos constituem, frequentemente, os pontos mais fracos das estruturas de madeira, resultante de um mau dimensionamento, de uma má execução ou de ataques biológicos. A sua rigidez desempenha um papel crucial na deformação de toda a estrutura bem como na distribuição dos esforços nos elementos constituintes. O reforço de ligações com materiais compósitos (FRP) constitui, actualmente, uma solução inovadora.

O reforço das ligações tradicionais é indispensável para assegurar o comportamento estável destas, em particular, nas zonas sísmicas, onde existe inversão de esforços na ligação. As soluções de reforço analisadas, com base no uso de materiais compósitos, revelaram-se eficientes no melhoramento do comportamento da ligação: além de exibirem maior capacidade resistente e rigidez, apresentam uma melhoria substancial na ductilidade. Garantiram ainda, a estabilidade das ligações ao longo de um maior número de ciclos de carga e descarga, resultando num incremento da capacidade de dissipação de energia, traduzido num aumento considerável do coeficiente equivalente de amortecimento viscoso. Comparando as duas soluções de reforço analisadas, conclui-se que a solução de reforço que apresenta um comportamento global melhor (em termos de ductilidade e capacidade resistente) é a solução com duas mantas de 5 cm de CFRP (provetes L<sub>2,i</sub>).

## 8. AGRADECIMENTOS

A investigação apresentada neste trabalho insere-se no projecto de investigação POCI/ECM/56552/2004 financiado pela FCT. Os autores agradecem à LusoMapei e à Lameltec, a cedência dos materiais necessários à realização da campanha experimental.

## 9. REFERÊNCIAS

- Appleton, J., 2003 - *Reabilitação de edifícios antigos. Patologias e tecnologias da intervenção*. Edições Orion, 455 p.
- Branco, J.; Cruz, P.; Piazza, M., 2006 – “Asnas de Madeira. A importância da rigidez das ligações” in *JPEE 2006: 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, LNEC, Lisboa, 13 a 16 de Dezembro. (Proceedings available only in CD).
- Costa, F. P., 1930 - "Asnas de madeira", *Enciclopédia prática da construção civil*, Vol. 1, Portugália Editora, 152 p.

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), 2005 - *Istruzioni per Interventi di Consolidamento Statico di Strutture Lignee mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*. CNR.

EN 408:2003 - *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*. CEN.

EN 12512:2001 - *Timber structures. Test methods – cyclic testing of joints made with mechanical fasteners*. CEN.

MAPEI, 2005 - *Sistemas FRP. Documentos Técnicos*.

Munafò, P., 2002 - "Analisi evolutiva delle capriate lignee in Italia" in *Le capriate lignee antiche per i tetti a bassa pendenza. Evoluzione, dissesti, tecniche di intervento*. Edit. Alínea, p. 21-72.

NP ENV 1995-1-1:1998 - *Eurocódigo 5: Projecto de estruturas de madeira. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifícios*. IPQ.

NP 4305:1995 – *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas – Classificação visual*. IPQ.

Piazza, M.; Senno M., 2001 – "Proposals and criteria for the preliminary evaluation, design and execution of works on ancient load-bearing timber structures" in *Wooden handwork/ Wooden carpentry: European Restoration Sites*. Edit. Elsevier, p. 263-277.

Piazza, M., 2004 – "Strutture di legno in Italia. Le nuove costruzioni ed il problema del consolidamento" in *Cimad'04. I° Congresso Ibérico. A madeira na construção*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, p. 21-42.

Tampone, G., 2000 – "Tecniche di esecuzione del restauro" in *Il restauro delle strutture di legno*. Ed. by Ulrico Hoepli Milano, p. 299-384.